

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 02-078948

(43)Date of publication of application : 19.03.1990

(51)Int.Cl. G01N 27/82  
G01R 33/12

(21)Application number : 63-228738

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 14.09.1988

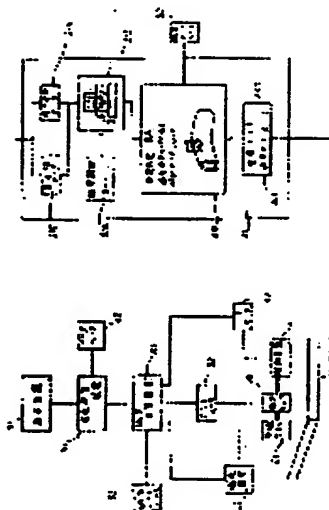
(72)Inventor : OTAKA MASAHIRO  
TAKAKU KAZUO  
YOSHIMURA TOSHIHIKO  
ISHIKAWA YUICHI  
HASEGAWA KUNIO  
ENOMOTO KUNIO  
SHIMIZU TASUKU

## (54) DEVICE AND METHOD FOR INSPECTING DETERIORATION DAMAGE OF METALLIC MATERIAL

### (57)Abstract:

**PURPOSE:** To accurately detect the extent of deterioration without any destruction by using a data base of the relation between variation of magnetic characteristics such as saturated magnetism, residual magnetism, coercive force, etc., and the damage and deterioration of a metallic material.

**CONSTITUTION:** Measurement data of an exciting coil 21, a magnetic sensor 31, and a driving device 41 are inputted to a magnetic arithmetic unit 51 through controllers 22, 32, and 42. The input data are inputted to an input memory 511 and outputted on a magnetic data display device 512, and the measurement state is checked. Further, basic magnetic data on respective materials are inputted from the magnetism data base 52. Then a magnetic field analytic arithmetic unit 513 analyzes a magnetic field and the data are processed by anisotropy data processing 517 and data processing 516 for the depth direction of the magnetic characteristics. Those data are inputted to a deterioration arithmetic unit 61 to accurately detect the extent of the deterioration of the metallic material which is used at high temperature without any destruction.



BEST AVAILABLE COPY

### LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許出願公告番号

特公平7-6950

(24) (44) 公告日 平成7年(1995)1月30日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 0 1 N 27/82

請求項の数5(全20頁)

(21) 出願番号 特願昭63-228738  
(22) 出願日 昭和63年(1988)9月14日  
(65) 公開番号 特開平2-78948  
(43) 公開日 平成2年(1990)3月19日

(71) 出願人 999999999  
株式会社日立製作所  
東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地  
(72) 発明者 大高 正廣  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内  
(72) 発明者 高久 和夫  
茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会  
社日立製作所日立工場内  
(72) 発明者 吉村 敏彦  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内  
(74) 代理人 弁理士 小川 勝男 (外1名)

審査官 平井 良憲

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 金属材料の劣化損傷検出装置及び検出方法

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 測定体に励磁コイル等により磁場を印加し、それによって前記測定体に生じた磁気の変化から劣化や損傷を検出する金属材料の検査装置において、前記測定体の飽和磁気、残留磁気、保持力、バルクハウゼンノイズ等の磁気特性を検出する磁気測定装置と数値解析手法により測定領域の磁界の状態を求める演算装置を備え、予め求めておいた飽和磁気、残留磁気、保持力、バルクハウゼンノイズ等の磁気特性の変化と金属材料の損傷や劣化との関係のデータベースから材料のひずみ損傷や劣化の程度を判定する演算装置及び出力する表示装置とを備えてなり、励磁コイルと磁気センサをアレー方式とし、最外周部に磁界の均一性を確保するため、最外周部にダミー励磁コイルを設けたことを特徴とする金属材料の劣化損傷検出装置。

2

【請求項2】 特許請求の範囲第1項において、励磁コイルと磁気センサの指向性を直交方向に交互に配置したことを特徴とする金属材料の劣化損傷検出装置。

【請求項3】 特許請求の範囲第1項において、磁気センサとして超電導量子干渉素子(SQUID)センサを用いて、磁気異方性を検出できるSQUIDセンサのピックアップコイル構造としたことを特徴とする金属材料の劣化損傷検出装置。

【請求項4】 磁気特性からひずみ損傷や劣化を判定する方法として、測定されたB-H特性に対して、あるひずみ量を仮定し、そのひずみ量における時効のデータベースから測定されたB-H特性に最も近いB-H特性を選択し、時効時間を決定し、次いでこの時効時間を基準に、この時効時間におけるひずみ量のデータベースから測定されたB-H特性に最も近いB-H特性を選択し、

新たにひずみ量を再決定し、ひずみ量を基準に、同様に上記の方法を繰返し、最終的に収束したひずみ量と時効時間を測定体のひずみ損傷や劣化を判定することを特徴とする金属材料の劣化損傷検出方法。

【請求項5】磁気特性からひずみ損傷や劣化を判定する方法として、測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに対して、あるひずみ量を仮定し、そのひずみ量における時効のデータベースから測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに最も近いバルクハウゼンノイズスペクトルを選択し、時効時間を決定し、次に、この時効時間を基準に、この時効時間におけるひずみ量のデータベースから測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに最も近いバルクハウゼンノイズスペクトルを選択し、新たにひずみ量を再決定し、ひずみ量を基準に、同様に上記の方法を繰返し、最終的に収束したひずみ量と時効時間から測定体のひずみ損傷や劣化を判定することを特徴とする金属材料の劣化損傷検出方法。

【発明の詳細な説明】

【産業上の利用分野】

本発明は、金属材料の損傷や劣化の検査方法及び装置に係り、特に、原子力プラント及び化学プラントの高温環境下で使用される含フェライト系ステンレス鋼、低合金鋼等の金属材料の実機部材における高温時効脆化、ひずみ損傷等の検知に好適な測定装置に関する。

【従来の技術】

従来の脆化測定方法の例としては、特開昭54-61981号公報に記載のような方法がある。ここでは、オーステナイト系ステンレス溶接金属の脆化の有無を初期の $\delta$ フェライト量が5%以上減少したことで判定するとしてある。

【発明が解決しようとする課題】

上記従来技術では、高温で使用する金属材料の内、特に、含フェライト系ステンレス鋼を例にとれば、高温長時間の使用により時効脆化を起こすことが、すでに知られている。これは、およそ600°C以上の比較的高温においては、 $\sigma$ 相の析出に起因する。 $\sigma$ 脆化が生じ、また、400°Cから500°Cの範囲では、いわゆる475°C脆性が生じることによる。しかし、475°C脆性は、400°C以下の温度範囲においても長時間使用中に生じうる可能性があり、含フェライト系ステンレス鋼の実機部材の高温での使用には十分の配慮が必要である。

しかしながら、上記従来技術は、500°C以下の脆化及び予ひずみがある場合のひずみ時効については配慮されておらず、475°C脆性の程度を検出できなかった。

また、実機溶接部の初期フェライト量は溶接位置で異なり、ばらつきも大きい。さらに、実機では、溶接箇所が膨大であるため、全部の溶接部及び機器材料の初期のフェライト量を全て監視することは困難である。したがって、従来技術は、初期フェライト量が不明な箇所には適用できないため、実機で実用化できないという問題があ

った。

一方、渦流検査法（Eddy Current Test Method以下ECTという）の例としては、特開昭55-141653号公報記載の「強析出効果型鉄基合金の劣化状態判定方法」がある。この従来例は、被測定材のECT値と使用前の被測定体、あるいはそれと同種材質の材料を被測定体の初期熱処理と同様の熱処理を施したもののECT値を比較し、その値が正か負かによつて鉄基合金の劣化状態を判定する方法を示している。

しかし、正負によつて判定するのみであるから、定量的な測定はできない。また、予ひずみがある場合のひずみ時効については配慮されていない。

本発明の目的は、高温環境下で使用する含フェライト系ステンレス鋼、低合金鋼等の金属材料の実機部材の脆化及びひずみ損傷の程度を非破壊的にかつ精度良く検知できる方法及び装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

上記目的は、材料の時効劣化に伴つて変化する材料の磁気的な特性を測定することにより材料の劣化及びひずみ損傷の程度を判定することができる。材料の磁気特性を示す磁気ヒステリシスの形態及び磁気バルクハウゼンノイズのレベルが材料の劣化の程とひずみ損傷の程度によく対応している。すなわち、この変化から金属材料の劣化及びひずみ損傷の程度を推定できる。

被測定体を局所領域を効率良く強磁場で励磁するのに、励磁コイルに超電導コイルを採用することも考えられる。

また、磁界の検出には検出コイルと積分器の代わりに高精度の磁気測定が可能な超電導量子干渉素子（SQUID）あるいは半導体のホール素子の磁気センサを用いて行うこともできる。

金属材料の劣化度や損傷度を推定するには、飽和磁気、残留磁気、保持力、磁気バルクハウゼンノイズ・レベル、材料データ等のパラメータに重回帰分析等の統計的なデータ処理を加えることにより高い相関性が得られる。

本発明の劣化損傷検出装置は、測定体に励磁コイル等により磁場を印加し、それによつて前記測定体に生じた磁気の変化から劣化や損傷を検出する金属材料の検査装置において、前記測定体の飽和磁気、残留磁気、保持力、バルクハウゼンノイズ等の磁気特性を検出する磁気測定装置と数値解析手法により測定領域の磁界の状態を求める演算装置を備え、予め求めておいた飽和磁気、残留磁気、保持力、バルクハウゼンノイズ等の磁気特性の変化と金属材料の損傷や劣化との関係のデータベースから材料のひずみ損傷や劣化の程度を判定する演算装置及び出力する表示装置とを備えてなり、更に、励磁コイルと磁気センサをアレー方式とし、最外周部に磁界の均一性を確保するため、最外周部にダミー励磁コイルを設けることを特徴とする。この場合に、励磁コイルと磁気センサ

の指向性を直交方向に交互に配置することや、磁気センサとして超電導量子干渉素子（SQUID）センサを用いて、磁気異方性を検出できるSQUIDセンサのピックアップコイル構造とすることが好ましい。

また、測定体を励磁する励磁コイルと測定体の磁気特性を検出する磁気センサを一体化することが好ましい。また測定体を励磁する励磁コイルと前記測定体の磁気特性を検出する磁気センサを測定体を挟んで配置し、測定体の漏れ磁束を測定し、材料のひずみ損傷や劣化を判定し、或いは励磁コイルを馬蹄形として測定体の磁気異方性を検出し、材料のひずみ損傷や劣化を判定することも有効である。

尚、後者判定方法を採用するなら、磁気異方性を測定するため、馬蹄形励磁コイルを回転させ、最大磁気と最小磁気の方向と値からひずみ損傷や劣化を判定することも一案である。

本発明の劣化損傷検出方法は、①磁気特性からひずみ損傷や劣化を判定する方法として、測定されたB-H特性に対して、あるひずみ量を仮定し、そのひずみ量における時効のデータベースから測定されたB-H特性に最も近いB-H特性を選択し、時効時間を決定し、次いでこの時効時間を基準に、この時効時間におけるひずみ量のデータベースから測定されたB-H特性に最も近いB-H特性を選択し、新たにひずみ量を再決定し、ひずみ量を基準に、同様に上記の方法を繰返し、最終的に収束したひずみ量と時効時間を測定体のひずみ損傷や劣化を判定する方法、または②磁気特性からひずみ損傷や劣化を判定する方法として、測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに対して、あるひずみ量を仮定し、そのひずみ量における時効のデータベースから測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに最も近いバルクハウゼンノイズスペクトルを選択し、時効時間を決定し、次に、この時効時間を基準に、この時効時間におけるひずみ量のデータベースから測定されたバルクハウゼンノイズスペクトルに最も近いバルクハウゼンノイズスペクトルを選択し、新たにひずみ量を再決定し、ひずみ量を基準に、同様に上記の方法を繰返し、最終的に収束したひずみ量と時効時間も測定体のひずみ損傷や劣化を判定する方法を特徴とする。

尚、原子炉圧力容器等の壁の磁気特性を測定する場合に内壁と外壁にそれぞれ励磁コイルと磁気センサを走査する駆動装置を配置し、内壁に励磁コイル、外壁に磁気センサあるいは、内壁に磁気センサ、外壁に励磁コイルを配置することが有効である。配管の磁気特性を測定する場合に配管内部と配管外部にそれぞれ励磁コイルと磁気センサを走査する駆動装置を配置し、配管内部に励磁コイル、配管外部に磁気センサあるいは、配管内部に磁気センサ、配管外部に励磁コイルを配置することが有効である。

更に測定された測定体の損傷と劣化のデータ及び測定体

の機器のデータベースより、将来における測定体の損傷や劣化の進行を劣化のデータベースから予測する機能を持たせることや、測定体の損傷や劣化の状態を表示する表示装置の画面を複数に分割し、測定条件や測定した磁気特性の表示、測定体の機器の使用環境や材質データ、判定した損傷や劣化のデータ、及び将来の機器の損傷劣化の進行予測等を表示し、必要に応じてマウスやキーボード等でデータの入力、修正でき、判定や演算を再修正できる機能部を具備することも有効である。

尚、本願明細書において「時効」とは、金属材料がある温度において、時間の経過に伴って現われる現象をいう。室温で起こるものを室温時効或いは自然時効といい、加熱によって起こるものを高温時効或いは人工時効という（以上、岩波理化学辞典より要旨引用。）また本願明細書において時効時間とは、ある温度で時効に要した時間をいい、また時効脆化とは、時効により金属材料が脆化する現象を意味する。

#### 〔作用〕

金属材料は、高温環境中で長時間使用すると、内部組織に変化を生じ、強度が低下する。含フェライト系ステンレス鋼の475℃熱処理を施した時効材のシャルピー衝撃試験結果をみると高温時効の熱処理時間の増加に伴い強度が低下することがわかる。

発明者らは、含フェライト系ステンレス鋼等の金属材料の高温加熱による脆化について種々検討した結果、高温時効に伴い、金属組織の粒界に他の相が析出したり、炭化物やS、Pが偏析することにより、硬さや衝撃強度等の機械的性質の他に電気抵抗率 $\rho$ や透磁率 $\mu$ などの電磁気的特性も変化することがわかった。特に、材料の高温時効脆化と磁気特性の変化とがよく対応することを見出した。受入れ材と高温熱処理材の磁気ヒステリシスの測定結果では、被測定体は脆化の程度により磁気ヒステリシスループの面積（磁気ヒステリシスロス）、残留磁気や保磁力等に変化が生じている。また、金属材料を励磁する際に発生する磁気バルクハウゼンノイズを測定すると、受入れ材と高温熱処理材とで磁気バルクハウゼンノイズ・レベルの成分に違いがみられる。

また、含フェライト系ステンレス鋼や低合金鋼等の金属材料に加工による塑性ひずみを加えると、その塑性ひずみに依存して材料の磁気特性が変化する。さらに、予ひずみを与えた材料を時効させた場合も同様にひずみ時効の程度に対応した磁気特性の変化が得られた。

すなわち、このような現象を利用すれば、含フェライト系ステンレス鋼や低合金鋼等の金属材料の加工ひずみや時効脆化の進行程度を精度良く検知することができる。

#### 〔実施例〕

次に、本発明の実施例を図面に基づいて説明する。本発明の原理となる測定体1の金属材料のひずみ損傷及び時効劣化と磁気特性との関係を図面を用いて説明する。

第20図は、2相ステンレス鋼について塑性ひずみを与えたときの磁気ヒステリシスループを示したものである。塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0\%$ と $\varepsilon_p = 2\%$ を比較すると、塑性ひずみにより磁気ヒステリシスループの形状が変化し、最大磁束密度と残留磁束密度に増加が認められる。しかし、保磁力は、ほとんど変化していない。

第21図は、2相ステンレス鋼CF3材とCF8材における塑性ひずみ量による残留磁束密度の変化を示したものである。図より塑性ひずみの増加に伴い、残留磁束密度は、急激に増加するが、塑性ひずみが大になるに従い残留磁束密度は飽和する傾向にある。CF3材とCF8材では、塑性ひずみ量による残留磁束密度の変化の傾向は同じであるが、その絶対値には多少違いがある。

第22図は、上記の材料について塑性ひずみ量と保磁力の関係を示したものである。図より塑性ひずみ量に無関係に保磁力は、ほぼ一定の値を示す。すなわち、塑性ひずみは、保磁力に影響しない。

第23図は、上記の材料について塑性ひずみ量と最大磁束材料密度の関係を示したものである。図より、塑性ひずみを与えることにより最大磁束密度に僅かの増加が見られるが、最大磁束密度は、塑性ひずみ量によらずほぼ一定の値を示す。

第24図は、金属材料に塑性ひずみを与えたときの塑性ひずみ印加方向と平行な方向の磁気特性(B-H特性)と直交方向の磁気特性(B-H特性)を示したものである。塑性変形により材料中の磁区が塑性ひずみ方向に揃い、平行な方向と直交方向に磁気の異方性が生じる。このため、塑性ひずみと平行な方向のB-H特性( $B \parallel \varepsilon_p$ )に対して直交方向のB-H特性( $B \perp \varepsilon_p$ )は、減少する。

第25図は、磁気異方性のデータを最大磁束密度 $B_p$ 及び残留磁束密度 $B_r$ とひずみ量 $\varepsilon$ との関係で整理したものである。即ち、塑性ひずみと平行な方向と直交する方向の磁気特性からひずみ状態が判定できる。

これらの特性をデータベースとして、金属材料のひずみ損傷を判定することができる。

次に金属材料の時効劣化と磁気の間を関係を図面に基づいて説明する。

第26図は、2相ステンレス鋼の時効に伴うシャルピー吸収エネルギーの変化を示したものである。時効時間の増加に伴いシャルピー吸収エネルギーが小さくなる。そこで、この変化を非破壊で測定するために、時効と磁気特性の関係を調べた。その一例を第27図に示す。処女材の磁気ヒステリシスループに対して時効材の磁気ヒステリシスループでは、最大磁束密度は殆ど変わらないが、残留磁束密度、保磁力と磁気ヒステリシスループ面積が増加していることがわかる。

次に、塑性ひずみ $\varepsilon_p = 2\%$ を与えた場合の2相ステンレス鋼材の処女材及び時効材の磁気特性(B-H特性)の一例を第42図に示す。塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0\%$ と2%の

処女材を比較すると、塑性ひずみにより磁気ヒステリシスループの形状が変化し、最大磁束密度と残留磁束密度に増加が認められる。しかし、保磁力は、ほとんど変化していない。この塑性ひずみ $\varepsilon_p = 2\%$ 材を時効すると、第27図と同様に、時効により磁気ヒステリシスループの形状に変化が認められ、磁気ヒステリシスループ面積、残留磁束密度及び保持力が増加している。しかし、最大磁束密度は、ほとんど変化していない。このことから塑性ひずみによる磁気特性への影響と時効による磁気特性への影響とは、別のメカニズムによると考えられる。すなわち、塑性変形により磁区が塑性ひずみ方向に異方性を持つために透磁率が増大し、最大磁束密度が増加する。また、時効では、磁性を持つフェライト相内に $\alpha'$ 相やG相などの析出するために磁区の回転モーメントは増加し、残留磁束密度や保持力が増加するものと考ええる。

塑性ひずみによる保磁力の変化を第28図に示す。処女材では、保磁力は塑性ひずみに無関係で一定である。時効材では、塑性ひずみに増加に伴い保磁力は増加するが、飽和する傾向にある。また、時効時間が大きいほど、この傾向は大きい。

第28図のデータを時効時間で整理したものを第29図に示す。図より、処女材では、保磁力は、塑性ひずみ量に無関係にほぼ一定であるが、時効時間の対数に対しては、ほぼ直線的に増加する傾向を示した。塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0.2\%$ 以下では、塑性ひずみの影響は見られない。塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0.2\%$ から2%の範囲では、塑性ひずみが大きいほど、保磁力の変化が大きくなる傾向を示した。さらに、塑性ひずみ $\varepsilon_p = 2\%$ 以上では、塑性ひずみの影響が飽和する傾向にあった。

塑性ひずみによる残留磁束密度の変化を第30図に示す。塑性ひずみに増加に伴い残留磁束密度は増加するが、飽和する傾向にある。また、時効時間が大きいほど、この傾向は大きい。

第30図のデータを時効時間で整理したものを、第31図に示す。図より、時効時間の対数に対して残留磁束密度は、ほぼ直線的に増加する傾向を示した。また、塑性ひずみ量が大いほど、残留磁束密度が大きく現われた。塑性ひずみによる最大磁束密度の変化を第32図に示す。最大磁束密度は、塑性ひずみを与えることにより急激に増加するが、塑性ひずみ量には無関係にほぼ一定の値を示した。塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0\%$ 材に対して塑性ひずみを負荷した試験片では、最大磁束密度が約50%増加した。また、時効による最大磁束密度の変化は、ほとんど見られなかった。

第32図のデータを時効時間で整理したものを第33図に示す。時効時間により最大磁束密度が変らないことが分かる。

第34図は、低合金鋼について塑性ひずみを与えたときの磁気ヒステリシスループを示したものである。塑性ひず

み $\varepsilon p = 0\%$ と $\varepsilon p = 4\%$ を比較すると、塑性ひずみにより磁気ヒステリシスループの形状が変化し、保磁力と残留磁束密度に増加が認められる。しかし、最大磁束密度は、ほとんど変化していない。

本発明の動作原理を第34図を用いて説明する。

金属材料は、高温環境中で長時間使用すると、内部組織に変化を生じ、強度が低下する。第34図に含フェライト系ステンレス鋼の475°C熱処理を施した時効材のシャルピー衝撃試験結果を示す。高温時効の熱処理時間の増加に伴い強度が低下している。

発明者らは、含フェライト系ステンレス鋼等の金属材料の高温加熱による脆化について種々検討した結果、高温時効に伴い、金属組織の粒界に他の相が析出したり、炭化物やS、Pが偏析することにより、硬さや衝撃強度等の機械的性質の他に電気抵抗率 $\rho$ や透磁率 $\mu$ などの電磁気的特性も変化することがわかった。特に、材料の高温時効脆化と磁気特性の変化とがよく対応することを見出した。受入れ材と高温熱処理材の磁気ヒステリシスの測定結果では、被測定体は脆化の程度により磁気ヒステリシスループの面積（磁気ヒステリシスロス）、残留磁気や保磁力等に変化が生じている。また、金属材料を励磁する際に発生する磁気バルクハウゼンノイズを測定すると、受入れ材と高温熱処理材とで磁気バルクハウゼンノイズ・レベルの成分に違いがみられる。

また、含フェライト系ステンレス鋼や低合金鋼等の金属材料に加工による塑性ひずみを加えると、その塑性ひずみ量に依存して材料の磁気特性が変化する。さらに、予ひずみを与えた材料を時効させた場合も同様にひずみ時効の程度に対応した磁気特性の変化が得られた。

すなわち、このような現象を利用すれば、含フェライト系ステンレス鋼や低合金鋼等の金属材料の加工ひずみや時効脆化の進行程度を精度良く検知することができる。

第35図は、低合金鋼における塑性ひずみ量と保磁力の変化を示したものである。図より塑性ひずみの増加に伴い、保磁力は、急激に増加するが、塑性ひずみが大になるに従い保磁力は飽和する傾向にある。この材料を時効した場合、保磁力は減少するが、時効時間に無関係に一定の値になる。

第36図は、低合金鋼における塑性ひずみ量と残留磁束密度の変化を示したものである。第35図の保磁力と同じ結果である。

第37図は、低合金鋼の時効に伴うシャルピー吸収エネルギーの変化を示したものである。時効時間の増加に伴うシャルピー吸収エネルギーの変化は小さい。

そこで、時効と塑性ひずみ量の変化を非破壊的に測定するために、磁気特性の関係を調べた。その一例を第38図及び第39図に示す。

第38図は、時効時間の増加に伴う低合金鋼の保磁力の変化を示したものである。処女材では、保磁力により塑性ひずみを判別できる。時効がある場合、塑性ひずみ $\varepsilon p$

= 1%以下は判定可能であるが、塑性ひずみ $\varepsilon p = 1\%$ 以上では保磁力は、一定値となる。

第39図は、時効時間の増加に伴う低合金鋼の残留磁束密度の変化を示したものである。処女材では、残留磁束密度により塑性ひずみを判別できる。時効がある場合、塑性ひずみ $\varepsilon p = 0.2\%$ 以下かあるいは $\varepsilon p = 0.5\%$ 以上かの判定は可能である。

このように、2相ステンレス鋼及び低合金鋼において、塑性ひずみ及び時効と磁気特性の変化には、密接な相関性が認められた。

次に、本発明のシステムの実施例を図面に用いて説明する。

第1図は、本発明による金属材料の劣化検査装置を実施するためのシステム構成の一例を示したものである。図において、1は原子力プラント等に用いられる機器あるいは配管等の測定体である。21は前記測定体1を励磁するための励磁コイルで、22は励磁コイル21の磁化装置である。31は前記測定体1の磁気を検出するための磁気センサで、32は、磁気センサ31のコントローラである。41は励磁コイル21や磁気センサ31の駆動装置で、42は、駆動装置41のコントローラである。51は、励磁コントローラ22、磁気センサコントローラ32や駆動コントローラ42からのデータを入力し、解析する磁気演算装置である。52は、測定体1の磁気データベースである。61は、磁気演算装置51で解析したデータを基に測定体の劣化度を判定する劣化演算装置である。62は、測定体1の磁気と劣化度の関係を示すデータベースである。71は、測定結果を出力する表示装置である。

本発明のシステムの動作は、先ず、前記測定体1を励磁コイル21で励磁し、このときの磁気変化を磁気センサ31で検出する。このセンサ部の実施例の詳細を第2図から第8図を用いて説明する。

第2図は、同軸構造のコア211内部に励磁コイル210を配置し、測定体1を励磁する構造のものである。中央のコアにはホール素子や検知コイル等の磁気センサ310が配置してあり、前記測定体1の磁気変化を検出する。

第3図は、第2図の実施例においてホール素子や検知コイル等の磁気センサ310を測定体1に対して励磁コイル210の反対側に配置したものである。前記測定体1の磁気変化を漏れ磁束で検出する。

第4図及び第5図は、測定体1の磁気異方性を検出するためのセンサである。第4図では、馬蹄形のコア212に励磁コイルを巻きつけ、測定体1を励磁する。この時の表面での漏れ磁束を磁気センサ310で検出する。第5図では、第4図の実施例における磁気センサ310を測定体1に対して励磁コイル210の反対側に配置したものである。前記測定体1の磁気変化を励磁コイル210の反対側の漏れ磁束から検出する。

又、測定効率を上げるために、励磁コイル21と磁気センサ31をアレー方式とした実施例を第6図及び第7図に示



す。

第6図は、一次元のアレー方式のセンサ部の実施例である。磁気測定方向が互いに直交する励磁コイル213,214と磁気センサ313,314が一次元に配列されており、最端部には磁気の拡散による乱れを補正するためのダミー励磁コイル215がある。このアレー方式のセンサを走査することにより測定体1の磁気特性を高速に検出できる。第7図は、第6図の一次元のアレー方式のセンサを二次元に拡張した実施例である。磁気測定方向が互いに直交する励磁コイル213,214と磁気センサ313,314が二次元に配列されており、外周部に磁気の拡散による乱れを補正するためのダミー励磁コイル215がある。この二次元アレー方式のセンサを走査することにより測定体1の磁気特性をさらに高速に検出できる。

第8図は、磁気センサに超電導量子干渉素子(SQUID)センサを利用した実施例である。

一般に生体検査等に用いられているSQUIDセンサ応用し、外部磁界を測定できるクライオスツット333の中に液体Heを注入し、SQUIDセンサ330が動作する温度に保持する。SQUIDセンサ330部は、ノイズを遮断する磁気シールド334の中にある。磁気信号は、ピックアップコイル331で検出する。ピックアップコイル331は、磁気異方性を検出するため楕円コイルが直交するように配置したもので、磁気異方性の差分を検出するようになっている。また、第9図及び第10図は、他のピックアップコイルの実施例である。第9図は、同軸上に二次微分コイルを形成したものである。磁気分布を高精度に検出できる。第10図は、微分型コイルを2個以上平行に配列したものであり、磁気分布を高精度に検出できる。

第1図における励磁コイル21及び磁気センサ31を走査するための駆動装置41の詳細を沸騰水形原子炉に適用した実施例について第11図から第16図を用いて説明する。

第11図は、沸騰水形原子炉の断面図である。610は原子炉圧力容器、611は制御棒、612は制御棒案内管、613は上部クリッド、614は炉心サポート、615は炉水である。原子炉圧力容器610の上部にはクレーン617がある。このクレーン617にケーブル900で駆動装置41aが釣下げられてあり、原子炉圧力容器610の炉水中615の内壁に駆動装置41aが配置されている。駆動装置41aはケーブルで原子炉圧力容器610の外に配置されたモニター618等に接続され、遠隔操作で動作する。

また、原子炉圧力容器610の外壁に駆動装置41bが配置されて、駆動装置41bは、ケーブル900の代りにレール620があり、軌道上を移動する。駆動装置41aと41bは遠隔操作により連動して原子炉圧力容器610の検査をすることができる。

第12図は、原子炉圧力容器点検X-Y走査型駆動装置の一例である。駆動装置41は、4本の支柱を持つフレーム891、原子炉圧力容器610の壁に固定するための吸盤892及び真空ポンプ893とフレーム891をX軸上に移動するため

のモータ895、ギアボックス896及び駆動シャフト898並びにY軸上に移動するためのモータ897、ギアボックスを備えたエアシリンダ899及び駆動シャフト894からなり、エアシリンダ899の先端には励磁コイル21及び磁気センサ31が装備してある。

他の実施例として沸騰水形原子炉の配管系に適用した例について第13図、及び第14図を用いて説明する。

第13図は、原子炉配管系外部点検用駆動装置の一例である。駆動装置41は、2分割可能な固定リング810と配管630の周方向に回転可能な回転リング811からなる。固定リング810には、駆動モータ820、ギアボックス821及び位置検出用エンコーダ827からなる3組の軸方向移動機構がある。軸方向の移動量は、ローラ824及びエンコーダ826で検出し、軸方向移動機構にフィードバックされる。回転リング811は、複数のブリー925により固定リング810に保持され、周方向の位置検出機能を備えた回転モータ823で駆動する。回転リング811の一部に励磁システム2及び磁気センサシステム3が装備したヘッド部850がある。なお、駆動モータ820,823、エンコーダ826,827、及びヘッド部850には磁気測定に磁気ノイズが影響しないように磁気シールドが施されてある。

第14図は、原子炉配管系内部点検用駆動装置の一例である。駆動装置41は、配管内を移動するための駆動系とセンサ部を走査する走査系とからなる。

駆動系では、ステツピングモータ等910によりタイミングベルト922を介して各々の駆動輪に伝達される。装置の配管内移動を可能とする。

走査系では、ステツピングモータ等925によりブリー924,928とタイミングベルト926を介して、シャフト923に伝達される。シャフト923の先端にある磁気センサ部を走査する。磁気センサ部は、励磁コイル21と磁気センサ31からなり、測定に際は、エアシリンダ931等で測定体に押しつけられる。

尚、第12図から第14図の駆動装置を組合せることにより第3図及び第5図の測定方法が可能となる。

上記のように、励磁コイル21、磁気センサ31、及び駆動装置41により、原子力発電プラント等の測定体1の磁気特性を検出できる。

次に、測定方法について2つの実施例について述べる。

第1の方法は、測定体1の厚さ方向の磁気特性を検出するものである。励磁コイルの出力を段階的に上昇させ、磁束の深さの方向への侵入度を変えて磁気特性の変化を測定する。深さ方向の情報は、2つの磁気特性データの差分から求まる。また、励磁コイルの周波数を変化させ、磁場に浸透深さを変えることにより、同様に求めることができる。

第2の方法は、測定体1の磁気異方性を検出するものである。第4図あるいは第5図の励磁コイルを用いて、測定体の全角度の磁気特性を測定し、最大感度と最小感度の方向や、磁気の角度分布から磁気の異方性が判定でき

る。

第1図において励磁コイル21、磁気センサ31、及び駆動装置41の測定データは、各々のコントローラ22、32、42を介して磁気演算装置51に入力される。

第15図に磁気演算装置51の詳細を示す。

測定体1を測定した励磁コイル21、磁気センサ31、及び駆動装置41のデータは、磁気演算装置51の入力メモリ511に取り込まれる。入力メモリ511の測定データは、磁気データ表示装置512に出力され、測定状態のチェックを行う。又、各材料の基本磁気データは、磁気データベース52から取り込まれる。

測定状態及び測定データのチェック後、磁界解析演算装置513により磁場が解析される。解析手法は磁界解析コード514から選択される。

磁界の解析の結果から、磁気特性の異方性のデータを分離する異方性データ処理517と、磁気特性の深さ方向のデータを分離する深さ方向のデータ処理516により、上記で述べたようにデータ処理される。

これらのデータは、劣化演算装置に入力される。

第16図に劣化演算装置61の詳細を示す。

磁界解析より求めた磁気特性の異方性と深さ方向のデータは、それぞれメモリ561、562に取り込まれる。

磁気特性の異方性のデータは、磁気異方性データ前処理563により劣化判定の前処理が行われ、最も相関性の高い順にパラメータが選択される。同様に磁気特性の深さ方向のデータについても磁気深さデータ前処理564により劣化判定の前処理が行われ、最も相関性の高い順にパラメータが選択される。これらの劣化パラメータは、劣化判定演算処理565に取り込まれ、測定体1の劣化度が判定される。

また、劣化判定のデータベースは、第20図から第42図に示すデータを有している。

劣化判定演算装置565のひずみ時効劣化判定の詳細の一例を第40図及び第41図を用いて説明する。

ある塑性ひずみと時効を受けた材料は、第40図及び第41図の結果を用いて、塑性ひずみと時効時間を定量的に分離することができる。例えば、測定された残留磁束密度Brが4500eであつたとすると、第48図より塑性ひずみ4%で時効時間100hr、塑性ひずみ0.5%で時効時間200hrあるいは塑性ひずみ0.2%で時効時間400hrの種々なケースがありうる。ここで、塑性ひずみ4%で時効時間100hrの場合、保磁力Hcは第49図より370eとなる。同様に、塑性ひずみ0.5%で時効時間200hrの場合、保磁力Hcは430e、塑性ひずみ0.2%で時効時間400hrの場合、保磁力Hcは540eとなる。したがって、残留磁束密度Brと保磁力Hcの大きさによつて塑性ひずみと時効時間が分離されることになる。残留磁束密度と保磁力から2相ステンレス鋼の塑性ひずみ量と時効時間を判定できる。

他の判定法の実施例として第17図と第18図の例を示す。

第17図は、磁気ヒステリシスループの形状からひずみ時

効の劣化度を判定するものである。

初期ひずみ量を仮定して、そのひずみ量における時効の程度の中から最も近い磁気ヒステリシスループを見つけ、時効時間を判定する。

次に、この時効時間におけるひずみ量の中から最も近い磁気ヒステリシスループを見つけ、ひずみ量を判定する。

更に、このひずみ量を仮定して、同様の判定を行い、収束したひずみ量と時効時間を判定する。

10 第18図は、バルクハウゼンノイズスペクトルについて第17図と同様の判定方法をするものである。

更に、求めたデータから現在の劣化の状態を判定すると共に、機器のデータベースから使用条件考慮して、例えば、第26図、第29図、第30図、第33図あるいは第37図等をグラフを内挿や外挿することにより、将来の劣化の進行を予測演算する。

このような方法によりひずみ時効を判定と今後の劣化の進行を推定できる。

第19図に表示装置71の詳細を示す。

20 表示装置71の画面は4分割され、磁気検査測定状態、機器のデータ、劣化度判定状態及び今後の劣化度進行予測を表示し、画面の上のマウス72により各々の条件を選択、修正等ができる。

これらの実施例によれば材料の磁気特性の変化からひずみ時効の程度を高精度に判定できるため材料の劣化評価を向上させることができる。

〔発明の効果〕

本発明によれば、高温で使用される金属材料の脆化の程度及び塑性ひずみ量を非破壊的にかつ迅速に検知できるので、機器の損傷を未然に防ぐことが可能となり、実機の安全性を高めることができる。

〔図面の簡単な説明〕

第1図は、本発明の実施例のシステム構成図、第2図、第3図、第4図、第5図は、夫々磁気センサ部の詳細を示す側面図、第6図、第7図は、夫々アレー式磁気センサの詳細を示す斜視図、第8図は、磁気センサにSQUIDセンサを領した例を示す断面図、第9図、第10図は、夫々SQUIDセンサのピックアップコイルの例を示す斜視図、第11図は、本発明を原子炉点検装置に応用した場合の断面模式図、第12図は、第11図の例に用いるX-Y走査駆動装置の斜視図、第13図は、同じく配管系外部検査装置の部分斜視図、第14図は、同じく配管系内部検査装置の側面図、第15図は、磁気演算装置の動作例を示すフロー図、第16図は、劣化演算装置の動作例を示すフロー図、第17図は、損傷の判定に用いる測定データの関係図、第18図は劣化の判定に用いる測定データの関係図、第19図は、表示装置の一例を示す平面図、第20図、第21図、第22図、第23図、第24図、第25図は、夫々2相ステンレス鋼の塑性ひずみによる磁気特性の変化を示す特性図、第26図、第27図、第28図、第29図、第30図、第31



15

図、第32図、第33図は、夫々2相ステンレス鋼のひずみ時効に関する機械的性質と磁気特性の変化を示す特性図、第34図、第35図、第36図、第37図、第38図、第39図は、夫々低合金鋼のひずみ時効に関する機械的性質と磁気特性の変化を示す特性図、第40図、第41図、第42図は、夫々ひずみ特性推定法を説明する時効時間に対する特性図である。

1……原子カプラント等に用いられる機器あるいは配管等の測定体、21……励磁コイル、22……励磁コントローラ、31……磁気センサ、32……磁気センサコントローラ、41……駆動装置、42……駆動装置コントローラ、51……磁気演算装置、52……磁気特性データベース、61……劣化演算装置、62……測定体1の磁気と劣化度の関係を示すデータベース、71……表示装置、72……マウス、210……励磁コイル、211……同軸構造のコア、212……馬蹄形のコア、213,214……磁気測定方向が互いに直交する励磁コイル、215……ダミー励磁コイル、310……ホール素子や検知コイル等の磁気センサ、313,314……磁気測定方向が互いに直交する磁気センサ、330……SQUIDセンサ、331……ピツクアップコイル、332……液体ヘリウム等の冷媒、333……外部磁界を測定できるクライオスタット、334……磁気シールド、511……入力メモリ、512……磁気データ表示装置、513……磁界解析演算装置、\*

16

\* 514……磁界解析コード、516……深さ方向のデータ処理、517……異方性データ処理、561……異方性のデータメモリ、562……深さ方向のデータメモリ、563……磁気異方性データ前処理、564……磁気深さデータ前処理、565……劣化判定演算装置、610……原子炉圧力容器、611……制御棒、612……制御棒案内管、613……上部グリッド、614……炉心サポート、615……炉水、617……クレーン、618……モニター、620……レール、630……配管、810……2分割可能な固定リング、810……2分割可能な固定リング、811……回転リング、820……駆動モータ、821……ギヤボックス、823……位置検出機能を備えた回転モータ、824……ローラ、825……ブーリー、826……エンコーダ、827……位置検出用エンコーダ、850……ヘッド部、891……4本の支柱を持つフレーム、892……吸盤、893……真空ポンプ、894……駆動シャフト、895……X軸モータ、896……ギヤボックス、897……Y軸モータ、898……駆動シャフト、899……ギヤボックスを備えたエアシリンダ、900……ケーブル、910……ステッピングモータ等、922……タイミングベルト、923……シャフト、924……ブーリー、925……ステッピングモータ等、926……タイミングベルト、928……ブーリー、931……エアシリンダ。

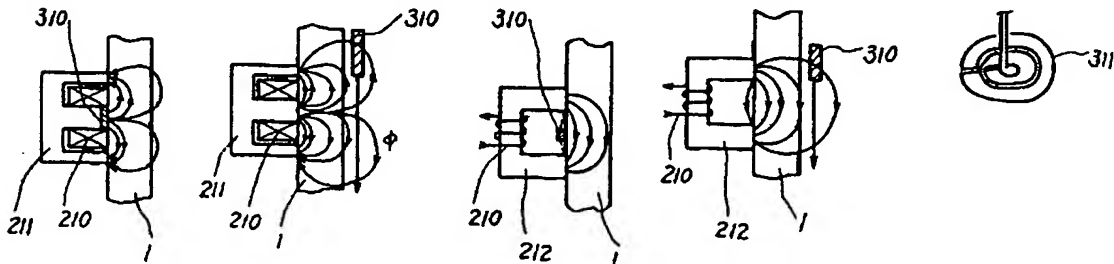
【第2図】

【第3図】

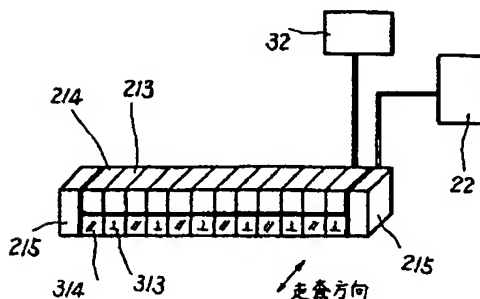
【第4図】

【第5図】

【第9図】



【第6図】



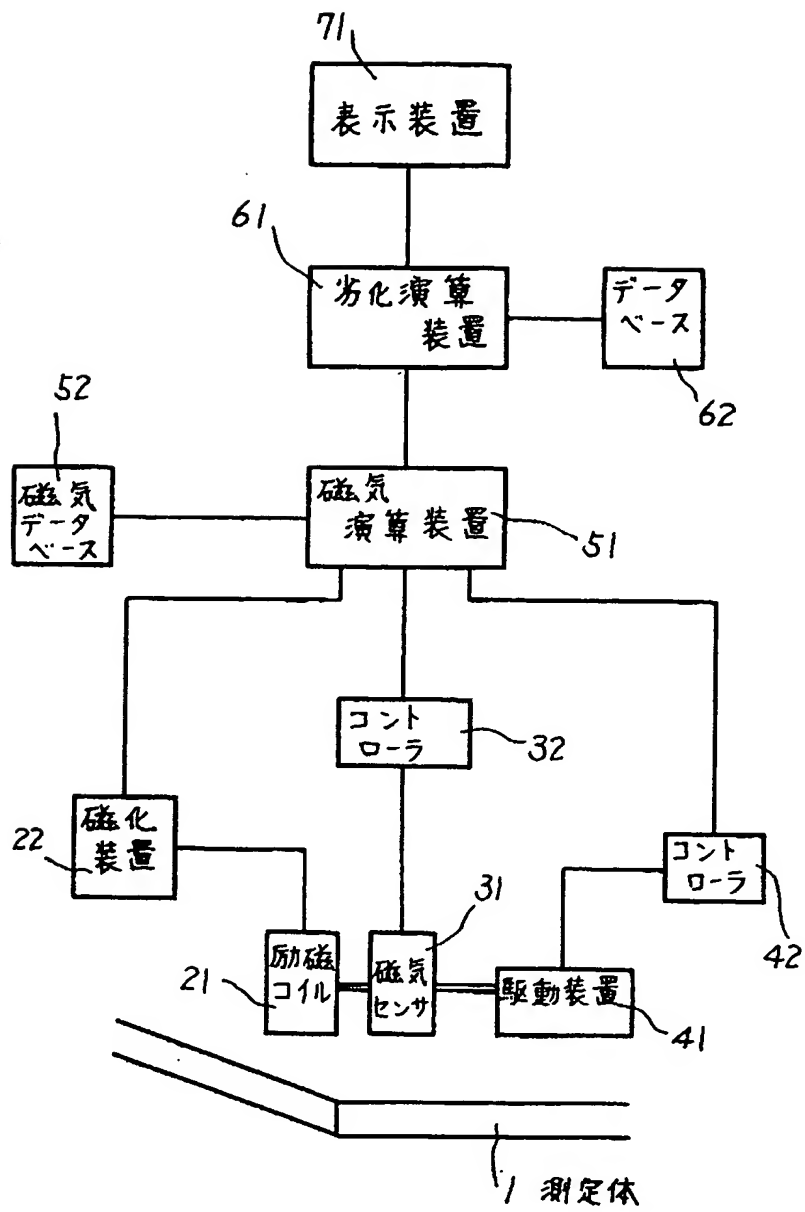
210…励磁コイル  
211…コア  
212…コア  
310…磁気センサ

【第10図】

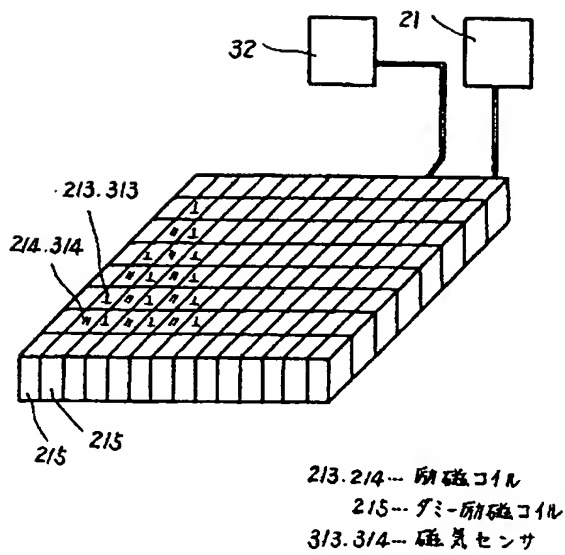


330…SQUIDセンサ  
333…クライオスタット  
334…磁気シールド

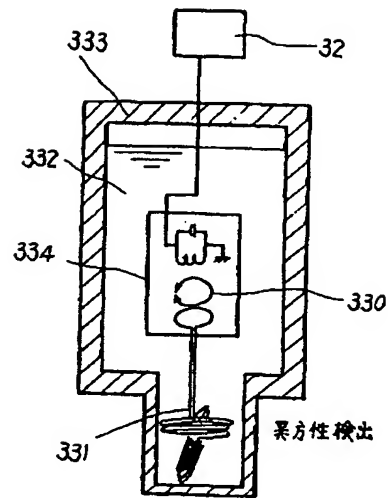
【第1図】



【第7図】

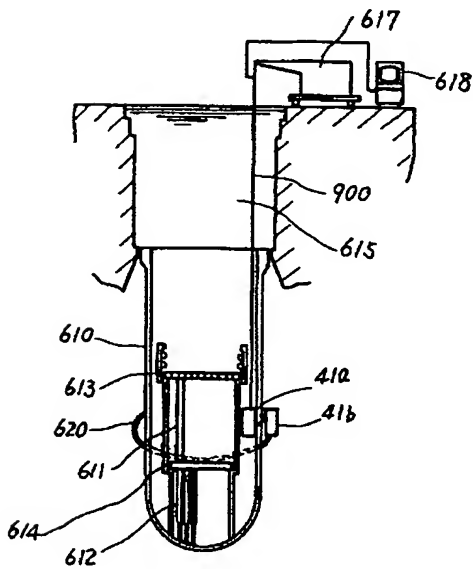


【第8図】

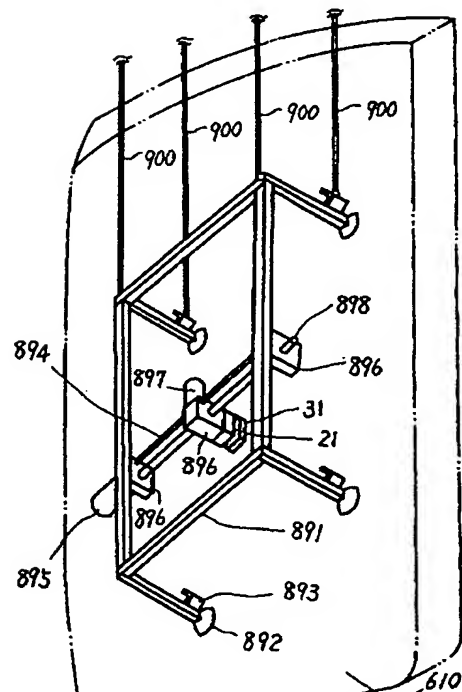


【第12図】

【第11図】

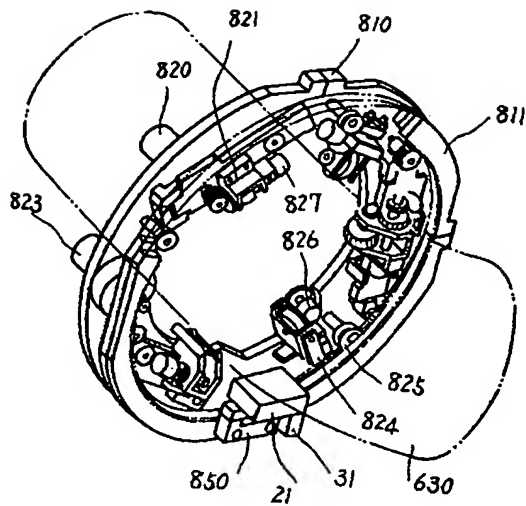


610... 原子炉圧力容器  
611... 制御棒  
612... 制御棒案内管  
613... 上部グリッド  
614... 炉心サポート  
615... 炉水  
617... フレーン  
618... モニター  
620... レール  
900... ケーブル



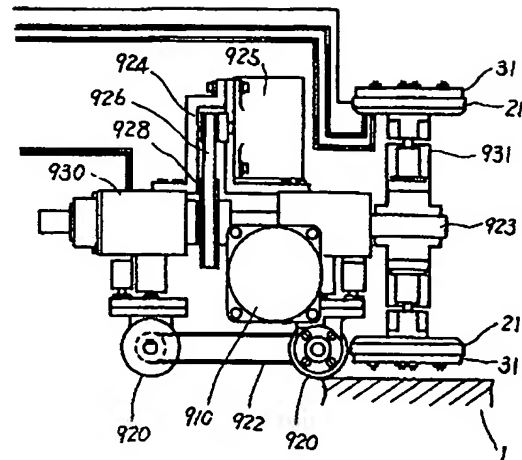
891... フレーム  
892... 吸盤  
893... 真空ポンプ  
894... 駆動シャフト  
895... X軸モータ  
896... ギヤボックス  
897... Y軸モータ  
898... シャフト  
899... エアシリンダ

【第13図】



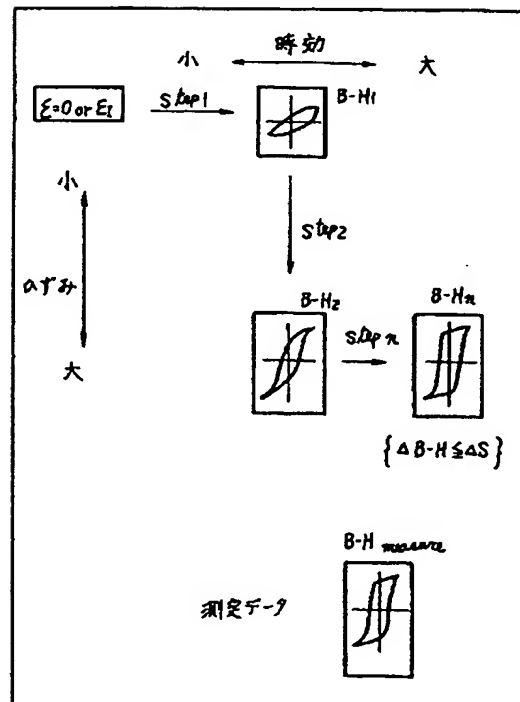
- 810... 固定リング  
 811... 回転リング  
 820... 軸方向駆動モータ  
 821... ギヤボックス  
 823... 周方向回転モータ  
 824... ロール  
 825... プーリー  
 826... エンコーダ  
 850... ヘッド

【第14図】

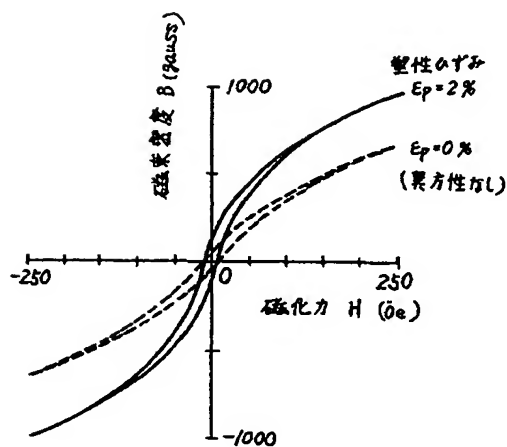


- 21... 励磁コイル  
 31... 磁気センサ  
 910, 925... ステッピングモータ  
 922, 926... タイミングベルト

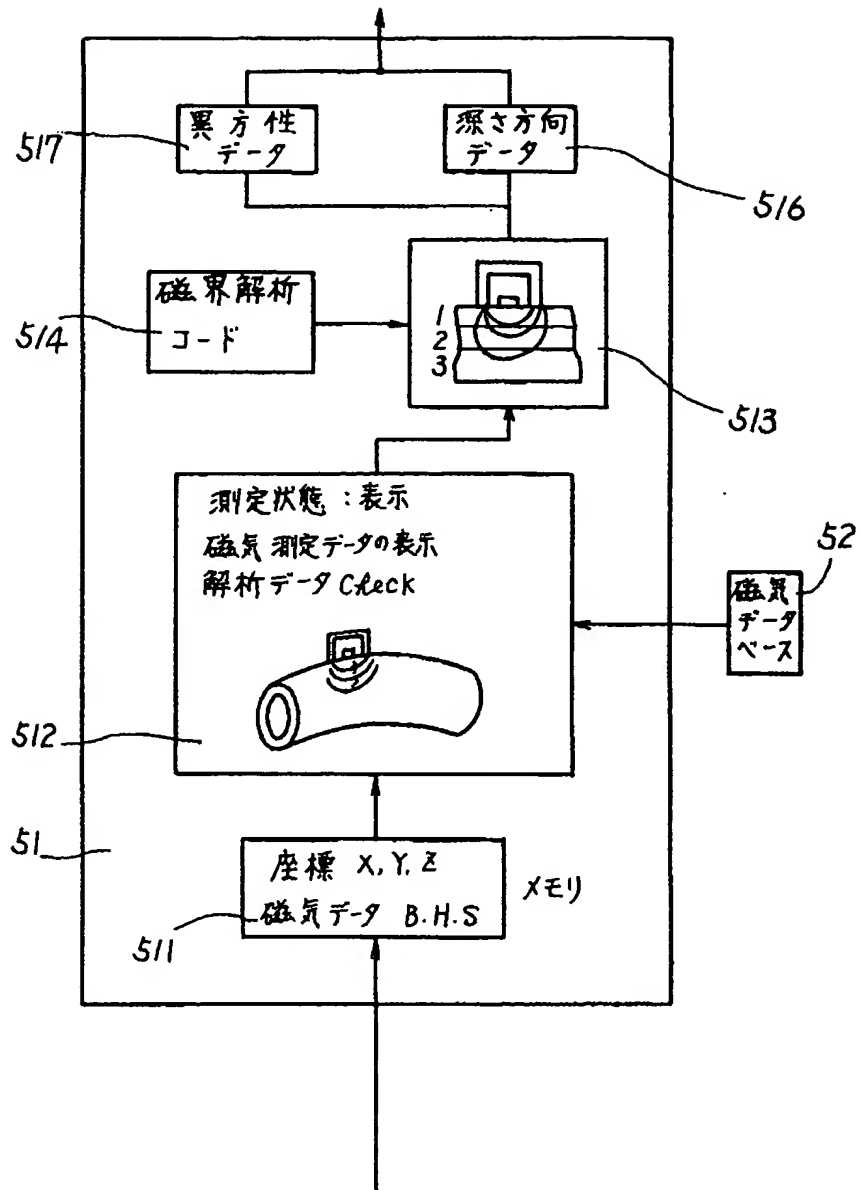
【第17図】



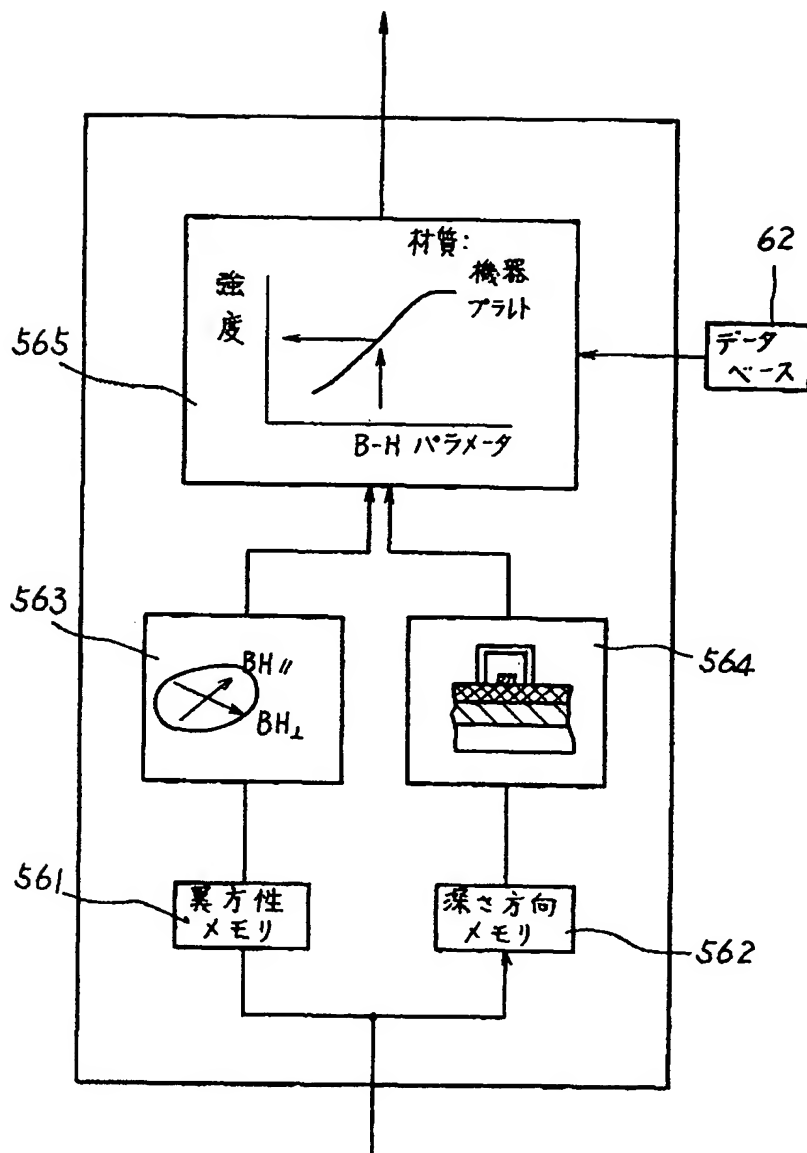
【第20図】



【第15図】

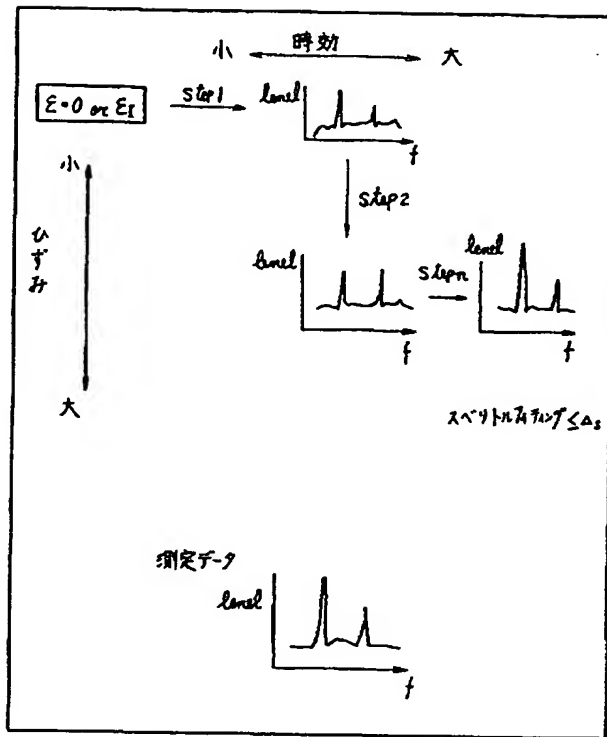


【第16図】

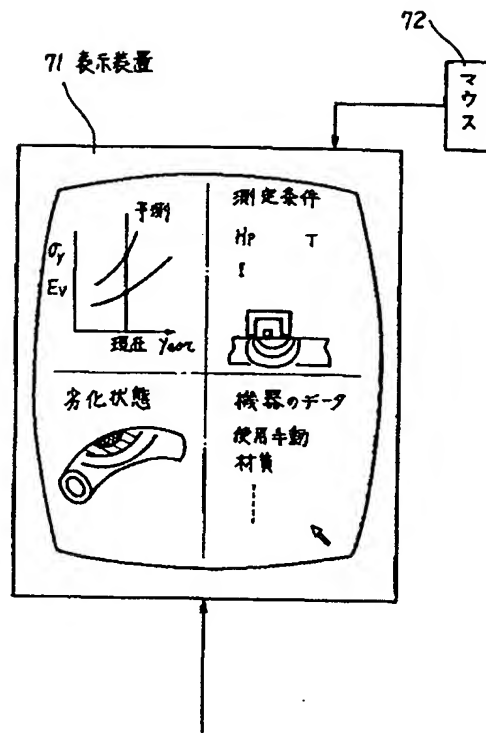




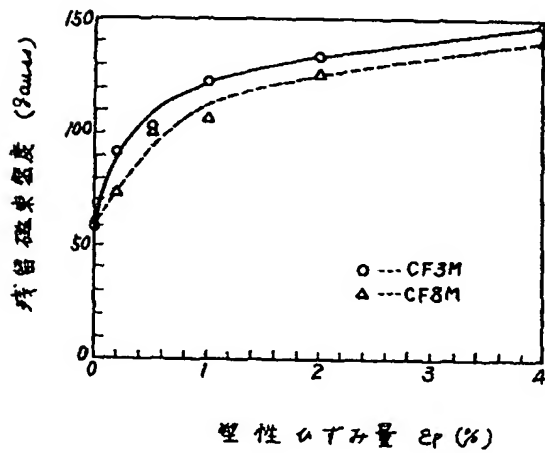
【第18図】



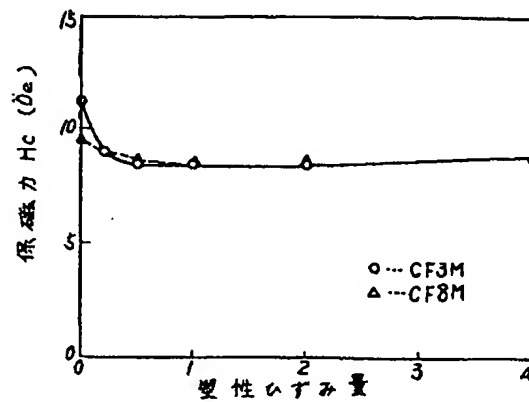
【第19図】



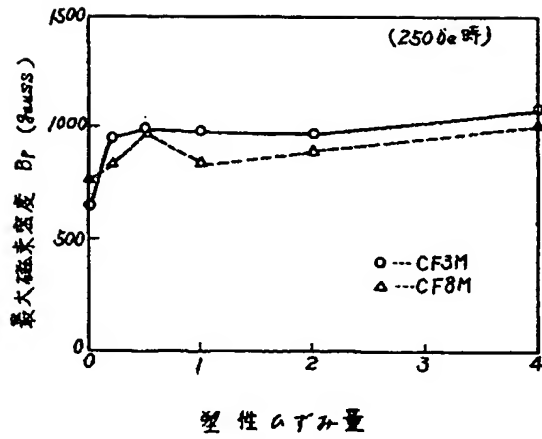
【第21図】



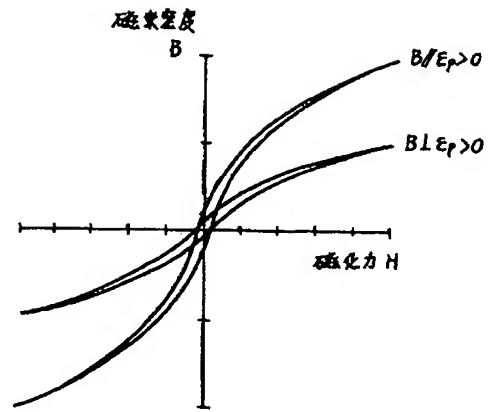
【第22図】



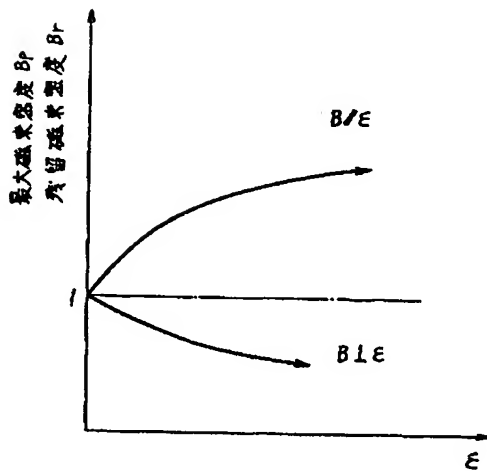
【第23図】



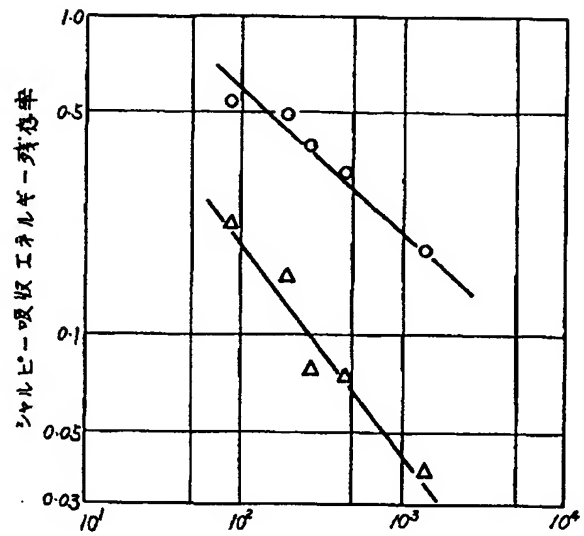
【第24図】



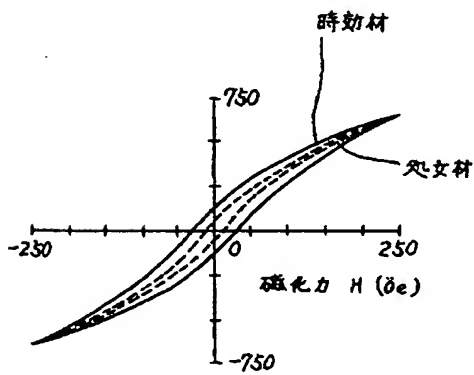
【第25図】



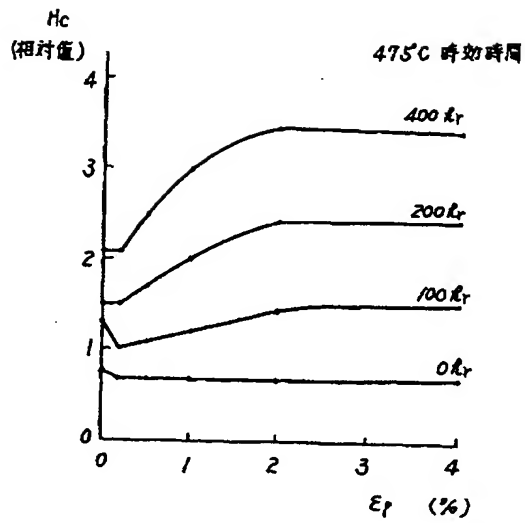
【第26図】



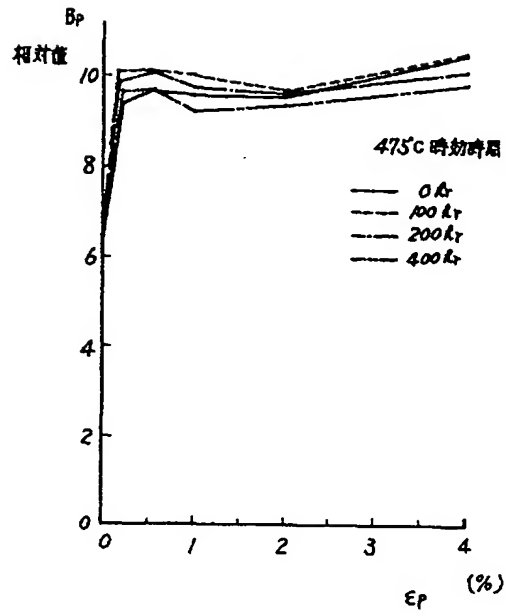
【第27図】



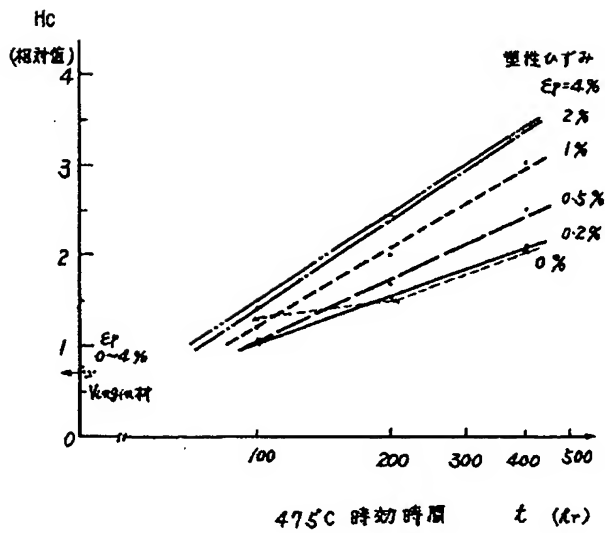
【第28図】



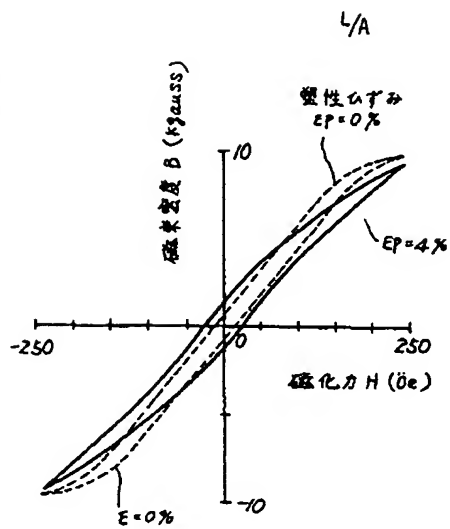
【第32図】



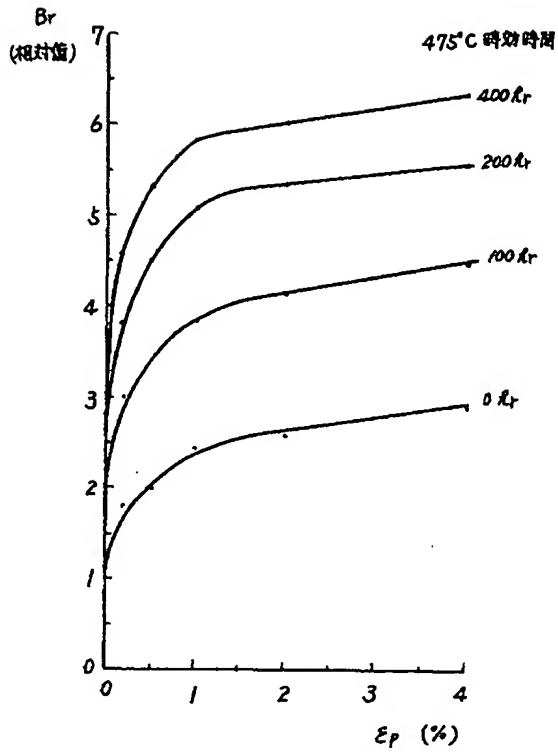
【第29図】



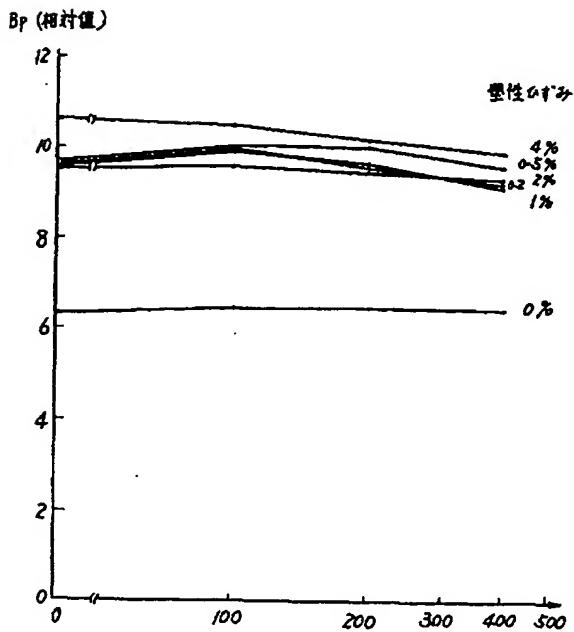
【第34図】



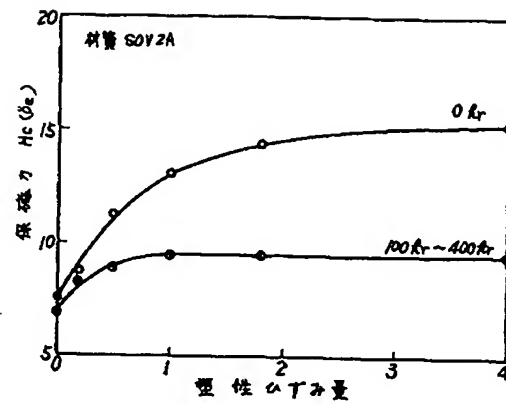
【第30図】



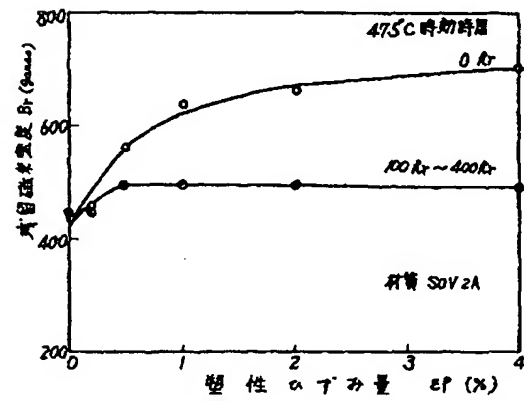
【第33図】



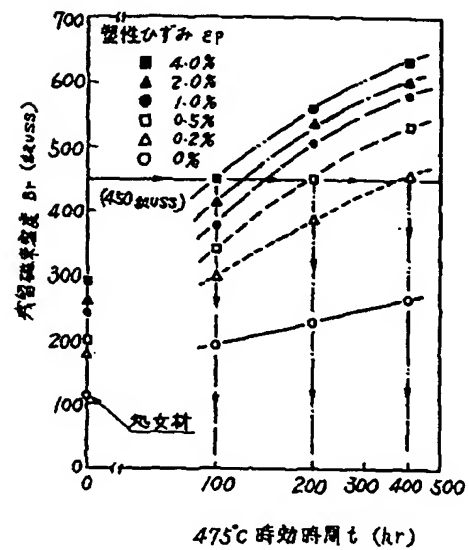
【第35図】



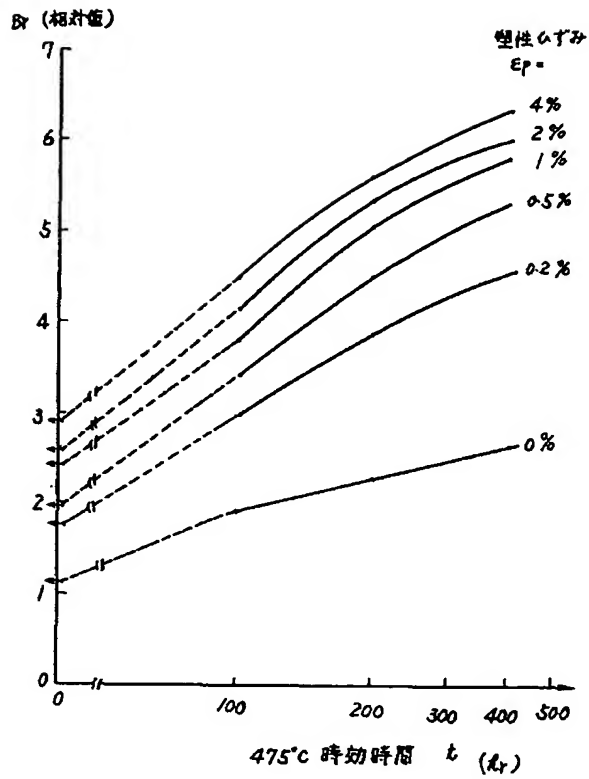
【第36図】



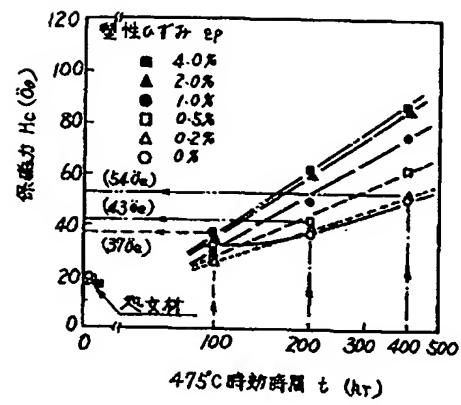
【第40図】



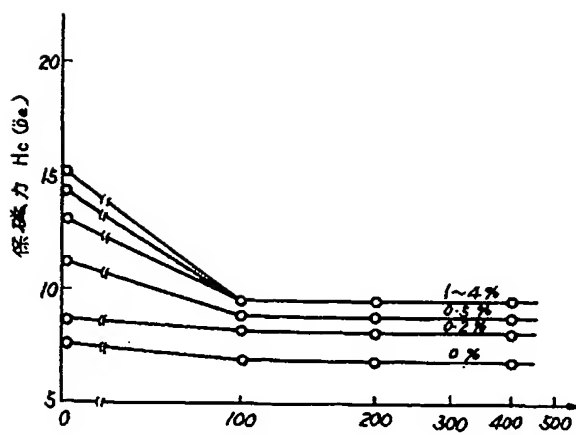
【第31図】



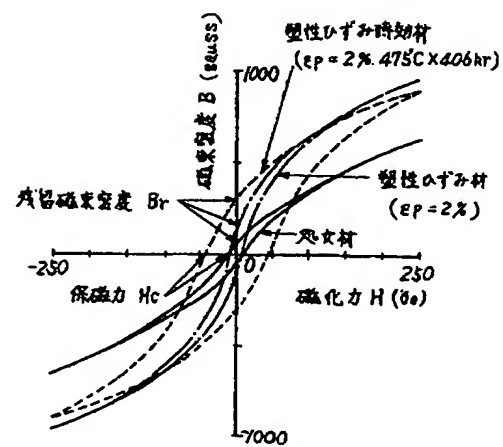
【第41図】



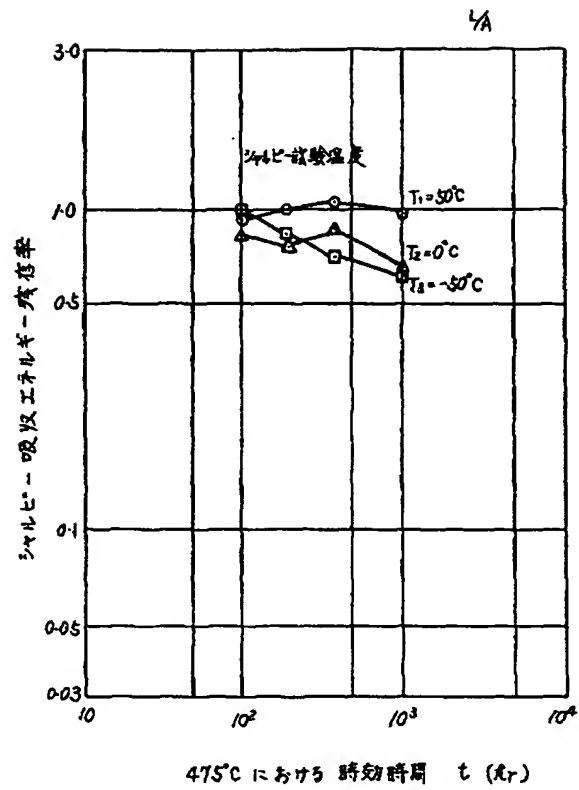
【第38図】



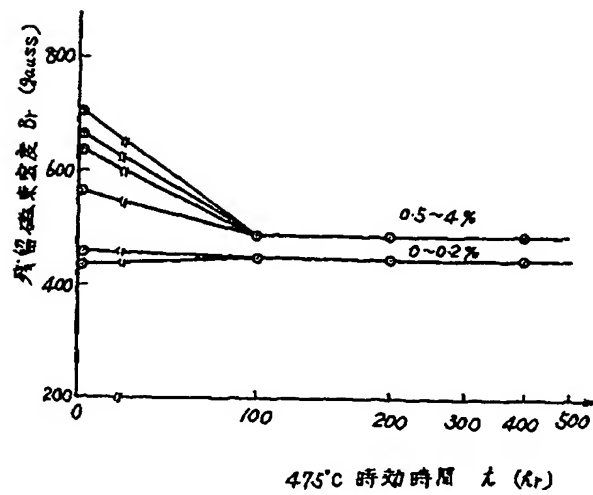
【第42図】



【第37図】



【第39図】





## フロントページの続き

(72)発明者 石川 雄一  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内  
(72)発明者 長谷川 邦夫  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内  
(72)発明者 榎本 邦夫  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内

(72)発明者 清水 翼  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日  
立製作所機械研究所内  
(56)参考文献 特開 昭61-277051 (J P, A)  
特開 昭55-46143 (J P, A)  
特開 昭60-243526 (J P, A)  
特開 昭58-60248 (J P, A)  
特開 昭61-172059 (J P, A)  
特開 昭59-178356 (J P, A)  
特開 昭60-147646 (J P, A)  
実開 昭61-161659 (J P, U)